

Relativitáselmélet

Fizika 11.

Modern fizika

2020. január 14.

Tartalomjegyzék

1 A téridő fogalmának kialakulása

- Az arisztotelészi dinamika
- A newtoni dinamika
- A Galilei-féle relativitási-elv
- A Maxwell-egyenletek
- Az éter elmélete

2 A speciális relativitáselmélet

- Einstein ötlete
- Speciális relativitáselmélet
- A híres képlet
- Az egyidejűség relativitása

3 Általános relativitáselmélet

- Az ikerparadoxon
- Gravitációs erőtvény
- Ekvivalencia elv
- Einstein ötlete
- A Merkúr pályája
- Napfogyatkozás 1919-ben
- Gravitációs idődilatáció
- Gravitációs lencsék
- Gravitációs hullámok

4 Kérdések

5 Irodalomjegyzék

Az arisztotelészi dinamika

- 1 Az égitestekre és a földi jelenségekre alapvetően más törvények vonatkoznak.
- 2 A nehéz testek lefelé, a könnyűek felfelé mozognak, míg az égitestekre a lassúság és az egyformaság jellemző.
- 3 A mozgás egy folyamat, mely a mozgató hatás hiányától hamar leáll. A test sebessége az őt ért erőhatással arányos:

$$v \sim F$$



1. ábra. Arisztotelész görög tudós és filozófus (Kr.e. 384 - Kr. e. 322), a peripatetikus dinamika képviselője.

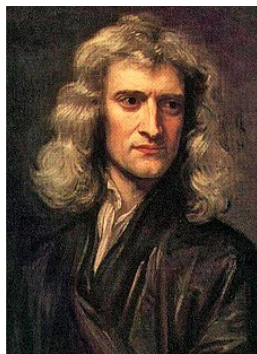
A newtoni dinamika

- 1 A mozgás nem folyamat, hanem állapot. A testek mozgásállapota megmarad, míg azt a környezet meg nem változtatja.
- 2 Nem a mozgásállapot fenntartásához, hanem annak megváltoztatásához kell erő.

$$\sum_i \vec{F}_i = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

- 3 Az erők párosával lépnek fel:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

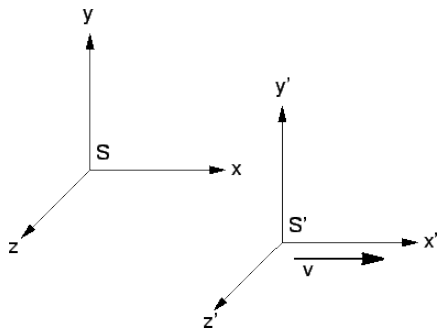


2. ábra. Sir Isaac Newton (1642-1727) angol fizikus, matematikus, csillagász, filozófus és alkimista.

Mozgástörvényei paradigmaváltást jelentettek a fizika fejlődésében.

A Galilei-féle relativitási-elv

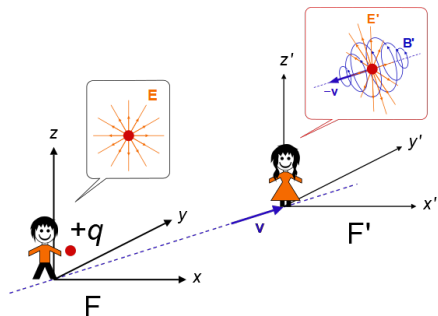
"Zárkózzál be egy hajó fedélzete alatti terembe. Vigyél oda szúnyogokat, gondoskodjál egy apró halakkal telt edényről is, azon kívül akassz fel egy kis vödört, melyből a víz egy szűk nyakú edénybe csöpög. Most figyelj meg gondosan, hogy a repülő állatok milyen sebességgel röpködnek a szobában minden irányba, míg a hajó áll. Meglátod azt is, hogy a halak egyformán úszkálnak minden irányban, a lehulló vízcseppek mind a vödör alatt álló edénybe esnek. Ha páros lábbal ugrasz, minden irányba ugyanolyan messzire jutsz. Jól vigyázz, hogy mindezt gondosan megfigyeld, nehogy bármi kétely támadhasson abban, hogy az álló hajón mindez így történik..."



3. ábra. Galileo Galilei (1564-1642) szerint az egymáshoz képest egyenes vonalú, egyenletes mozgást végző rendszerek a mechanikai jelenségek szempontjából egyenértékűek.

A Maxwell-egyenletek

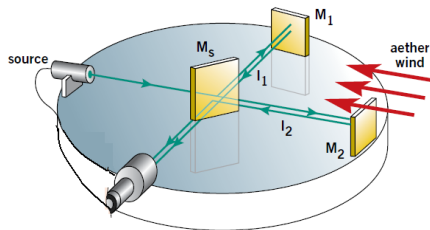
- Látszólag az elektromágnesség törvényeiben mintha lenne abszolút hely és mozgás.
- A mozgó töltések mágneses mezőt keltenek, a mágneses mező mozgó töltésekre pedig Lorentz-erővel hat.
- A Maxwell-egyenletek szerint az elektromágneses hullámok vákuumban c sebességgel terjednek, függetlenül az őket kibocsátó forrás esetleges mozgásától.



4. ábra. Egy nyugvó töltés körül állandó elektromos mező van. A mozgó töltés maga körül mágneses mezőt kelt.

Az éter elmélete

- Az elektromágnesség téves, kiforratlan elmélet, vagy a klasszikus mechanika hibás?
- Az elektromágneses hullám az éterben halad, sebessége az éterhez képest $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s.
- Az éter sebessége más irányból, sőt fél év múlva is ennyinek adódott, nem látunk örvényeket, nagyon kemény lenne, ha létezne.

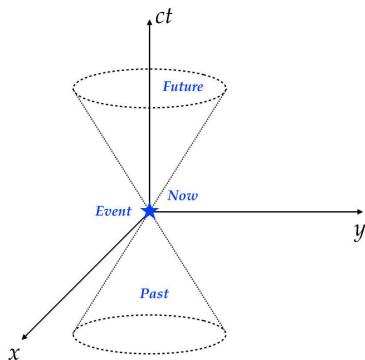


5. ábra. Michelson és Morley 1887-ban megmérte a Föld éterhez - tehát az abszolút térhez - viszonyított sebességét, mely nullának adódott. Nem sikerült igazolni az éter létezését.

Einstein ötlete

1905-ben egységes magyarázat.
1908-ban Minkowski¹ írta le a geometriát hozzá. Az alapelvek:

- A fizika (és nem csak a mechanika) törvényei minden inerciarendszerben azonosak.
- A vákuumbeli fénysebesség pedig minden inerciarendszerben azonos.



6. ábra. A Minkowski-tér a háromdimenziós Euklideszi tér idődimenzióval való kiterjesztése.

¹Hermann Minkowski (1864-1909) litván születésű német matematikus.

Speciális relativitáselmélet

- A mozgó tárgyak kívülről nézve rövidebbek. Az L_0 hosszúságú v sebességű űrhajó kívülről nézve megrövidül a sebesség irányában:

$$L' = \frac{L_0}{\gamma} \quad \text{ahol } \gamma \text{ a Lorentz-faktor:} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

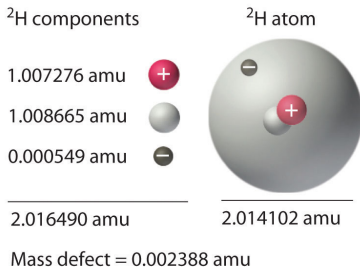
- Ha v_1 sebességgel halad egy űrhajó, hozzá képest v_2 -vel egy rakéta, akkor kívülről nézve a rakéta sebessége:

$$v'_2 = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}} \quad \text{Kis sebességre a klasszikus képletet adja.}$$

A híres képlet: $E = m \cdot c^2$

- A tömeg és az energia között összefüggés van.
- Radioaktív bomlások, csillagok energiatermelése.
- Ha a test mozog, akkor van impulzusa:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$$

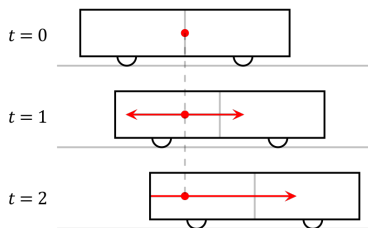


7. ábra. A deutérium alkotóelemei külön-külön nehezebbek. Energia szabadult fel létrejöttékor, ezért csökkent a tömege is. Ahhoz is energia kell, hogy a kötések felbomoljanak.

Az egyidejűség relativitása

Nem állíthatjuk különböző helyeken bekövetkező eseményekről, hogy abszolút értelemben egyidejűek.

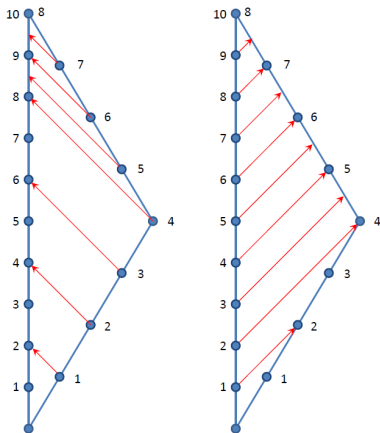
- Egy vonat közepéről fény indul, a rajta ülő szerint a vonat elejét és hátulját egy időpontban éri el, a két esemény egyidejű.
- Külső megfigyelő számára a vonat vége "elébe szalad" a fénykibocsátás helyének, míg az eleje távolodik tőle. A vonat vége felé haladó fénynek kisebb távolságot kell megtennie, mint az előre haladónak.



8. ábra. A vasúti töltésen álldogáló szerint a fény hamarabb érte el a vonat hátulját. A felvillanás nem egyidejűleg éri el a vonat két végét.

Az ikerparadoxon

- A mozgó rendszerben az idő mintha lassabban múlna, mint kívülről nézve, a lassulást a Lorentz-faktor adja meg.
- Egy távoli csillagot felkereső iker számára kevesebb idő telik el, ő kevesebb újévi üdvözletet küld testvérének, mint ő neki.
- A GPS műholdjait korrigálni kell, a kozmikus müonok leérnek a Földre.



9. ábra. Az ikerparadoxon.

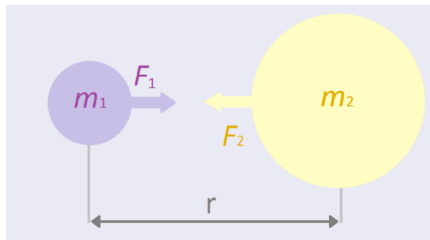
Gravitációs erőtvény

- Newton levezetett egy erőtvényt Kepler törvényeiből.
- Két tömeggel rendelkező test között vonzás tapasztalható:

$$F_{1;2} = F_{2;1} = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

- A gravitációs állandó:

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

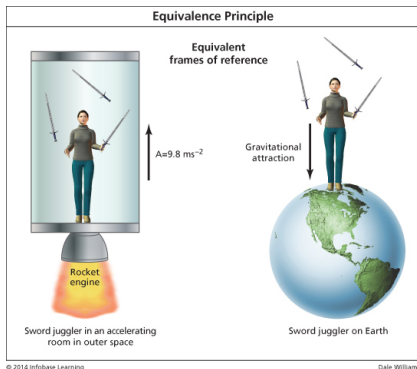


10. ábra. Ha az egyik testet eltávolítjuk, azt a másik test azonnal érzi, a hatás így végtelen sebességgel halad, ami a speciális relativitáselmélet szerint lehetetlen.

Ekvivalencia elv

Az általános relativitáselmélet egyik alapgondolata, hogy a gravitációs mező gyorsulása és a vonatkoztatási rendszer gyorsulása egyenértékű. Így nem tudjuk eldönteni egy zárt kabinból, hogy

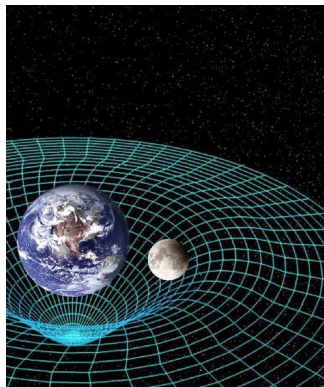
- Az űrben $a = 9,81 \text{ m/s}^2$ -tel gyorsul a kabin.
- Vagy egyszerűen a Föld felszínén áll.



11. ábra. Az ekvivalencia elv szerint a két eset nem különböztethető meg.

Einstein ötlete

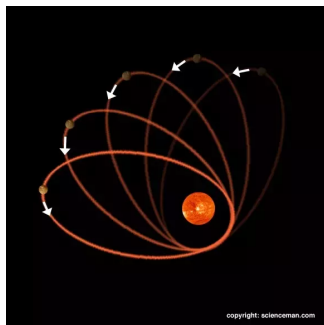
- A világ jobban modellezhető a téridővel, melyben az anyag görbületet hoz létre.
- A téridő görbülete a benne elhelyezett tömeggel nő, és ez a görbület hat a többi tárgy mozgására.
- Egyfajta, súlyok által megnyújtott gumilepedőhöz hasonlít, ahol a tárgyak a görbült felszín miatt keringenek pályájukon.



12. ábra. A Hold mozgásának magyarázata a téridő görbületével.

A Merkúr pályája

- A Merkúr pályája 100 év alatt 574 szögmásodpercet elfordul.
- Ebből körülbelül 43 szögmásodperc nem magyarázható meg a newtoni mechanikával².
- Az általános relativitáselmélet ezt helyesen adja meg.

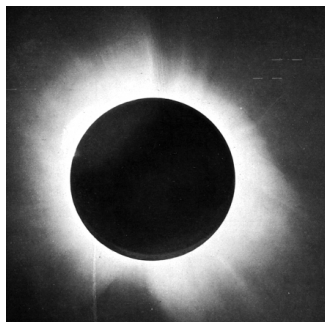


13. ábra. A Merkúr napközelségi pontja vándorol, ezt perihélium-precesszióknak nevezik.

²A többi bolygó hatása alapján

Napfogyatkozás 1919-ben

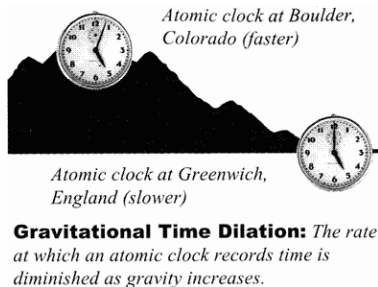
- Az általános relativitáselmélet modellje szerint görbült téridőben is egyenesen halad a fény, **látszólag** irányt módosít.
- Eddington meghatározta néhány csillag látszólagos helyét, és éppen úgy változott a helyük, mint ahogy azt az einsteini elmélet jósolta.
- Ezen az elven működik a **gravitációs lencse**.



14. ábra. Eddington (1882-1944) az Afrikához közeli Príncipe szigetére utazott az I. világháború után, hogy megfigyelje az 1919. május 29-i napfogyatkozást.

Gravitációs idődilatáció

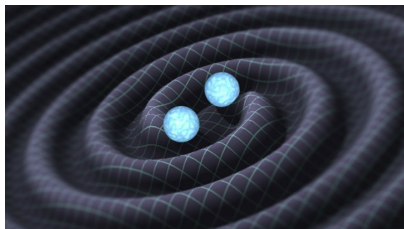
- Nehéz objektum úgy görbíti meg a téridőt, hogy a közelében lassabban járnak az órák, mint tőle távol.
- A GPS-műholdak a speciális relativitáselmélet miatt napi $7,4 \mu\text{s}$ -ot késnének
- Az általános relativitáselmélet szerint (és a valóságban is) napi $45 \mu\text{s}$ -et sietnek, mert fent kisebb a gravitációs tér.



15. ábra. A gravitációs idődilatáció miatt gyorsabban járnak az órák ott, ahol nagyobb a gravitációs mező nagysága.

Gravitációs hullámok

- A gyorsan mozgó nehéz objektumok úgy görbítik a teret, hogy abból egyfajta hullámozás jöjjön létre.
- 2015-ben a LIGO kísérlet végre (kb 100 évvel az elméleti jóslat után) érzékelt gravitációs hullámokat. A kutatócsoportban az ELTE kutatói is részt vesznek.



16. ábra. Fekete lyukak vagy neutroncsillagok összeolvadása kelthet gravitációs hullámokat.

Kérdések: Speciális relativitáselmélet

- 1 Mit jelent a speciális relativitáselmélet fő alap gondolata?
 - 1 A fizika törvényei minden egyenletesen mozgó rendszerben azonosak.
 - 2 Semmilyen kísérlettel nem állapítható meg, hogy egy adott vonatkoztatási rendszer mozog-e.
 - 3 Minden relatív.
 - 4 Egyik sem.
- 2 Mi a híres $E = mc^2$ formula lényege?
 - 1 A tárgyak tömege energiatartalmukkal ekvivalens.
 - 2 Adott tárgy energianövekedése a tömeg növekedését jelenti.
 - 3 Adott tárgy mozgási energiája a tárgy tömegével ekvivalens.
 - 4 Egyik sem.

Kérdések: Speciális relativitáselmélet

- 1 Mi az ikerparadoxon problémafelvetésének lényege?
 - 1 Az ikrek találkozásukkor más korúak, holott a mozgás relatív.
 - 2 Az ikerpár egyik tagja nem ugyanannyi üzenetet küld a másiknak, mint ahányat a másiktól kap.
 - 3 Az ikerpár egyik tagja megöregszik, míg a másik nem.
- 2 Mi jelent a Lorentz-faktor?
 - 1 A közel fénysebességgel mozgó tárgyak ennyivel rövidebbnek látszódnak, és óráik ennyivel lassabban járnak.
 - 2 A közel fénysebességgel mozgó tárgyak ennyivel rövidebbnek látszódnak, és óráik ennyivel gyorsabban járnak.
 - 3 A közel fénysebességgel mozgó tárgyak ennyivel hosszabbnak látszódnak, és óráik ennyivel gyorsabban járnak.

Házi és szorgalmi feladat

Házi feladat

Mennyi ideig tart a Földről az Androméda-galaxisig az út, ha a fénysebesség 10%-val megyünk?

Szorgalmi

Milyen gyorsan kell menni az Androméda-galaxisig, hogy 42 év alatt ott legyünk?

Irodalomjegyzék